

IMPLEMENTACIÓN DE UN ANALIZADOR DE REDES TRIFÁSICO A BAJO COSTO

Paul Arqui, Bernardo Vallejo.

poularqui@live.com, bvallejo@itsct.edu.ec.

Carrera de Electrónica, ISTCT

Resumen

El analizador de redes trifásicas es un dispositivo electrónico portátil que ayuda a determinar el estado de un sistema de distribución de energía de forma rápida y segura, a través de la medición y registro del voltaje y corriente de la red, así como detectar posibles fallos que involucran pérdidas o sanciones económicas. El proyecto implementa una solución de bajo costo, en base a una plataforma de desarrollo electrónico (Arduino), para el monitoreo y análisis de los parámetros eléctricos fundamentales de la red. Este instrumento permite medir señales eléctricas de tensión y corriente en tiempo real, a través de 3 conectores y 3 pinzas amperimétricas. El analizador de redes trifásico cuenta con una interfaz gráfica GLCD para la visualización de las curvas de las señales conectadas y los valores medidos de las tres tensiones y corrientes de línea, adicional puede determinar el desfase entre las dos señales, datos base para el cálculo de la potencia activa(P) reactiva(Q) y aparente(S).

Palabras Claves: Voltaje, corriente, Analizador de red, GLCD, pinza amperimétrica, Factor de potencia.

Abstract

The three-phase network analyzer is a portable electronic device that helps determine the status of energy distribution system quickly and safely, through the network voltage and current register, as well as all possible failures that involve economic losses or sanctions. The project implements a low-cost solution, based on an electronic development platform (Arduino), for the monitoring and analysis of the fundamental parameters of the network. This instrument allows to measure voltage and current signals in real time, through 3 connectors and 3 current clamps. The three-phase network analyzer has a graphical interface GLCD for visualization of the curves of the connected signals and the measured values of the three voltages and currents of the line, in addition there may be the lag between the two signals, base data for the calculation of active (P) reactive (Q) and apparent (S) power.

Keywords: Voltage, current, network analyzer, GLCD, clamp meter, power factor.

Los Analizadores de red son instrumentos empleados para la detección temprana de problemas de calidad energética de forma rápida, segura y detallada. Entre los tipos que se pueden encontrar en el mercado destacan los analizadores monofásicos y trifásicos, clasificación determinada por la cantidad de líneas a las que el equipo puede conectarse para obtener el detalle de sus parámetros más importantes.

El objetivo principal de un analizador de red es detectar las perturbaciones energéticas que afectan la calidad del suministro eléctrico. Perturbaciones que han sido definidas por el estándar 1159-1995 del IEEE, y los ha organizado en categorías (Seymour & Horsley, 2010).

Las categorías Son: los transitorios, Interrupciones, subtensiones, sobretensiones, distorsión de onda, fluctuación de tensión y variaciones de frecuencia. Los transitorios se clasifican en impulsivos y Oscilatorios, siendo los primeros, eventos repentinos que elevan la tensión o corriente de forma muy rápida en dirección positiva o negativa, entre las causas que los provoca se incluyen rayos, puesta a tierra deficiente, encendido de cargas inductivas, entre otros, mientras que los segundos corresponden a un cambio repentino en la condición de estado estable de la tensión o corriente de una señal que fluctúa a la frecuencia natural del sistema. Esta perturbación ocurre cuando se conmuta

una carga inductiva o capacitiva, como un motor o un banco de capacitores. Las interrupciones son la pérdida total de tensión o corriente durante un determinado tiempo, pueden ocurrir por diversas causas, pero en su mayoría se producen por algún daño a la red de eléctrica.

La subtensión es una reducción de la tensión manteniendo la frecuencia, suele ocurrir por fallas del sistema, o son el resultado de encender cargas con altas corrientes de arranque. La sobretensión es un aumento de la tensión o de la corriente que al igual que la subtensión mantiene la frecuencia, suelen ser provocadas por conexiones neutras con alta impedancia, una falla monofásica dentro de un sistema trifásico o reducciones repentinas de carga.

Se pueden diferenciar 5 tipos de distorsiones de la forma de onda, tales como desplazamiento por corriente continua, Armónicas, Interarmónicas, Corte intermitente y ruido. Las fluctuaciones de tensión son una variación de la forma de onda, cualquier carga que muestre variaciones de corriente puede causar fluctuaciones de tensión, se puede observar esta perturbación en el parpadeo de luces incandescentes.

Por último, las variaciones de frecuencia que suelen ocurrir cuando en las instalaciones poseen generadores dedicados de reserva o una infraestructura pobre de alimentación (Seymour & Horsley, 2010).

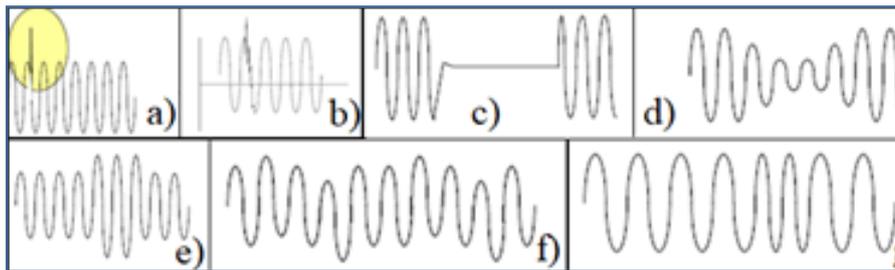


Figura 1.a) transitorios Impulsivos, b) transitorios Oscilatorios, c) Interrupciones, d) subtensiones, e) sobretensiones, f) fluctuación de tensión y g) variaciones de frecuencia. Información tomada de: "Los siete tipos de problemas en el Suministro Eléctrico"

Fuente: Seymour, J., & Horsley, T., 2010.

Cada una de estas categorías representan problemas que pueden perjudicar a los usuarios, sea provocando daños en los equipos, o generando sanciones económicas por parte de la empresa distribuidora de electricidad. Otros parámetros diferentes a las perturbaciones que se pueden determinar con un analizador son: tensiones, corrientes, potencia y factor de potencia.

El valor de corriente y tensión alterna, cambia en cada instante e incluso de sentido, siguiendo un ciclo repetitivo según una función senoidal a una frecuencia determinada que en el caso de

nuestro país es de 60 Hz lo que equivale a un periodo de 16.67ms entre pico y pico. En una señal alterna se pueden observar distintos parámetros tales como el valor máximo, el valor medio, el valor eficaz, el valor pico a pico, etc.

El analizador se encarga de determinar los valores eficaces tanto de corriente como de tensión de cada línea, Valores que equivalen a producir la misma cantidad de calor que una señal de corriente continua.

La relación entre el valor pico y el valor efectivo o eficaz está determinado por la expresión:

$$ValorEficaz = \frac{ValorPico}{\sqrt{2}}$$

Ec.1

La potencia se define como la relación que existe entre la cantidad de energía generada o consumida dentro de un intervalo de tiempo, en el caso de la potencia eléctrica es el resultado de la multiplicación de la corriente por la tensión, cuando se trabaja con corriente alterna se debe considerar otras variables para el cálculo de potencia, debido principalmente a la con-

exión de cargas capacitivas o inductivas, las que producen una componente activa y una reactiva que dan lugar a tres tipos de potencia: Aparente (S), potencia total consumida por la carga; Activa(P), potencia útil de trabajo y Reactiva(Q), potencia disipada por las cargas reactivas tales como bobinas y capacitores (Floyd, 2007).

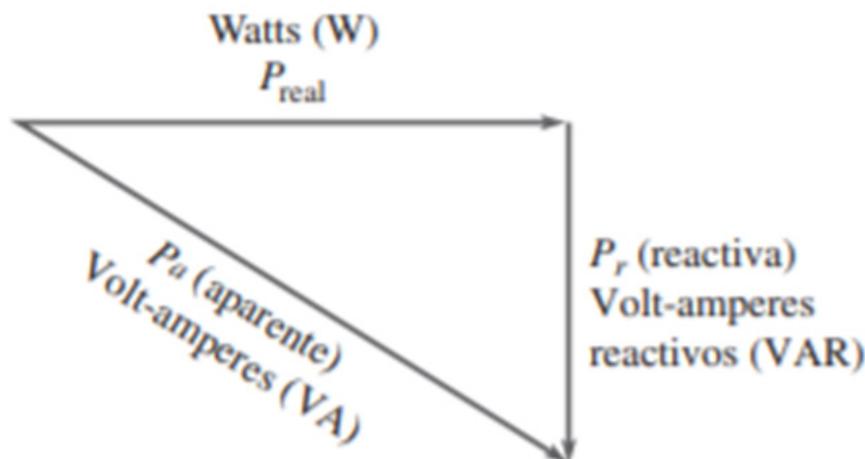


Figura 2. Triángulo de Potencia. Información tomada de: "Principios de Circuitos Eléctricos" por Floyd, T., 2007.

Fuente: www.pearsoneducacion.net/floyd

El ángulo que se forma entre la potencia aparente y la potencia activa se conoce con el nombre de factor de potencia ($\cos \varphi$), su valor varía entre 0 a 1 y es utilizado para medir la eficiencia del consumo eléctrico. Es un parámetro regulado por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad, la ARCONEL (2018) establece que: "el consumidor que mantenga suscrito un contrato de conexión con una Distribuidora, cancelará a ésta la penalidad por bajo factor de potencia cuando sea inferior a 0.92, aplicado al pliego tarifario vigente(p.34).

Según el PLIEGO TARIFARIO PARA LAS EMPRESAS ELECTRICAS DE DISTRIBUCIÓN, Período Enero - Diciembre 2018, la penalización por tener un factor de potencia menor al establecido se calcula utilizando la fórmula:

$$P_{BFP} = B_{FP} \times FSPEEi$$

Ec.2

$$B_{FP} = \frac{0.92}{FPr} - 1$$

Ec.3

Dónde:

FPr = Factor de potencia registrado.

PBFP = Penalización por bajo factor de potencia.

BFp = Factor de penalización.

FSPEEi=Factura por servicio público de energía eléctrica inicial.

Además la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (2018) establece que:

Cualquiera sea el tipo de consumidor de la categoría general, con medición de energía reactiva, cuando el valor medio del factor de potencia sea inferior a 0,60, la distribuidora, previa notificación, podrá suspender el servicio público de energía eléctrica hasta que el consumidor adecue sus instalaciones a fin de superar dicho valor límite.

El conjunto de parámetros analizables en una red eléctrica sea monofásica o trifásica

contribuyen a determinar la calidad del servicio de energía, y el conocer el estado de cada uno de ellos pueden permitir al usuario final tomar las medidas necesarias para reducir las perturbaciones que perjudiquen a los procesos o al desarrollo normal de sus actividades. Los altos costos de los equipos analizadores de red comerciales es una desventaja al momento de querer implementarlos, con esa motivación se busca desarrollar un equipo que tenga un costo más asequible y que brinde la información más importante del estado de la red de distribución de energía eléctrica.

El desarrollo del proyecto se da como una investigación de tipo aplicada y tiene como propósito describir el procedimiento realizado hasta obtener un prototipo de analizador de red trifásico que permita determinar el consumo energético de la red, a través de la medición

de parámetros como la tensión corriente, factor de potencia y potencia consumida por fase.

La construcción del analizador se divide en dos etapas para facilitar su descripción, la primera es el diseño de hardware y la segunda el diseño del Software.

Diseño de Hardware

El equipo está diseñado a partir de una placa Arduino Mega 2560 (núcleo del analizador), 3 pares de conectores lagarto, 3 pinzas amperimétricas de 30A, 3 transformadores 120v a 12v ac, un teclado matricial 4x4, un GLCD de 128x64 pixeles, un lector de memoria SD, una pcb con el

circuito de acondicionamiento y un cargador de 7v dc.

En el siguiente diagrama se observan las etapas que forman el Hardware, etapas en las que se integran los componentes antes mencionados:

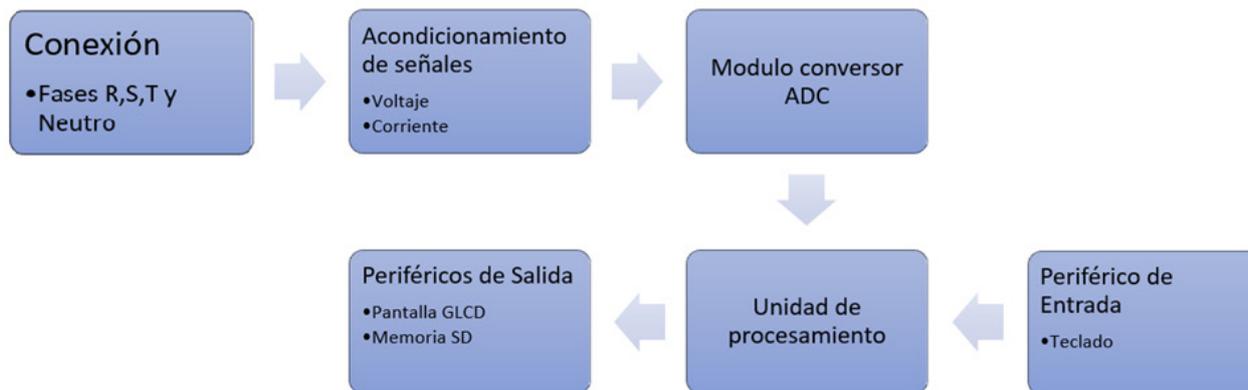


Figura 3. Diagrama de etapas del Hardware.
Fuente: Elaboración propia.

En la etapa de conexión para la tensión se utiliza conectores lagartos por la facilidad de conexión para pruebas, se conectan a 3 transformadores cada uno dedicado para una tensión de fase, la tensión de entrada es de 120v ac y la de salida de cada uno es de 12v ac. Para la corriente se hace uso de pinzas amperimétricas

que presentan la ventaja de no ser invasivas y pueden conectarse directamente a la línea de tensión. El modelo de pinza seleccionado es el SCT-013-30 el cual funciona como un transformador de corriente a tensión, su corriente de entrada va de 0 a 30 amperios y la salida de tensión es de 0 a 1v respectivamente.



Figura 4. Pinza Amperimétrica. Información tomada de: Sensor de corriente eléctrica no invasivo con Arduino y SCT-013.
Fuente: <https://www.luisllamas.es/arduino-sensor-corriente-sct-013/>

Las entradas analógicas del Arduino mega tienen un rango de lectura desde 0 hasta 5 voltios, debido a lo cual es necesario realizar un acondicionamiento de las señales que entregan los sensores antes de conectarlos a sus entradas.

Para el caso de la tensión se utiliza dos circuitos divisores de tensión, el primero para reducirla a un valor inferior a los 5v, tensión analógica máxima que pueda leer el Arduino, al ser una señal ac existen valores negativos que se deben

eliminar, el método utilizado es conectar un circuito elevador que introduce una señal dc, para hacerlo utilizamos el segundo divisor de tensión y un capacitor que permite desacoplar la señal ac de la referencia, como recomendación el capacitor debe tener una reactancia baja de alrededor de unos cientos de ohmios.

Se selecciona un capacitor de 10uF que genera una reactancia de 265.26 la cual cumple con el criterio antes mencionado.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 * \pi * 60 * 10\mu F} = 265.26\Omega$$

Ec.4

El diseño realizado produce en la salida del primer divisor 2.47v pico y en la salida del segundo divisor 2.5v dc, la salida del segundo di-

visor eleva la tensión total hasta 4.97v pico positivo y 0.03v pico negativo valores dentro del rango de medida permitido por el Arduino.

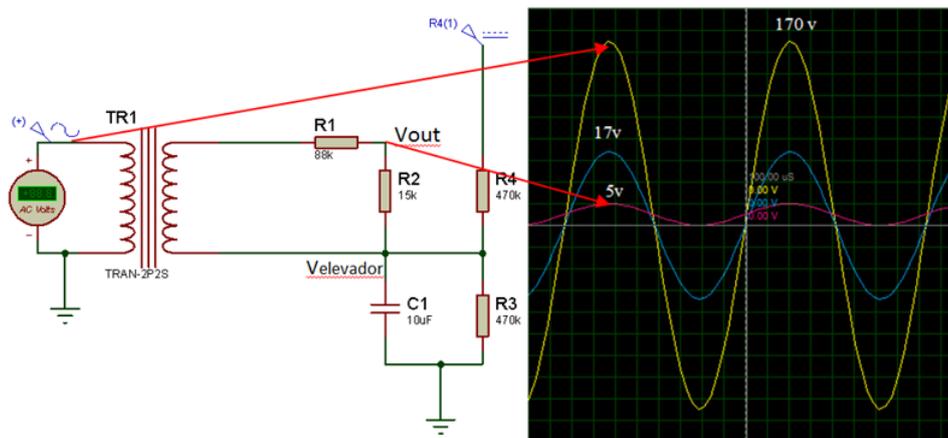


Figura 5. Circuito Acondicionamiento de Tensión.
Fuente: Elaboración propia.

$$V_{o1} = 12\sqrt{2}v * \frac{15k\Omega}{88k\Omega+15k\Omega} = 2.47v$$

Ec.5

$$V_{elevador} = 5v * \frac{470k\Omega}{470k\Omega+470k\Omega} = 2.5v$$

Ec.6

$$V_{out_{max}} = V_{elevador} + V_{o1} = 2.5 + 2.47 = 4.97v$$

Ec.7

Para el caso de la corriente se realiza un diseño más simple convirtiendo la corriente a un valor equivalente de tensión.

Solo se utiliza un divisor de tensión junto a un capacitor para elevar la tensión y desacoplar la señal ac de la referencia, el valor máximo de ten-

sión efectiva entregada por las pinzas amperimetricas es de 1v, lo que equivale a una tensión pico de 1.7v, el circuito elevador al tener los mismos valores de que el circuito anterior genera una tensión dc de 2.5v que se suman a la señal ac dando como resultado una señal con 4.2v de pico positivo y 0.8v de pico negativo.

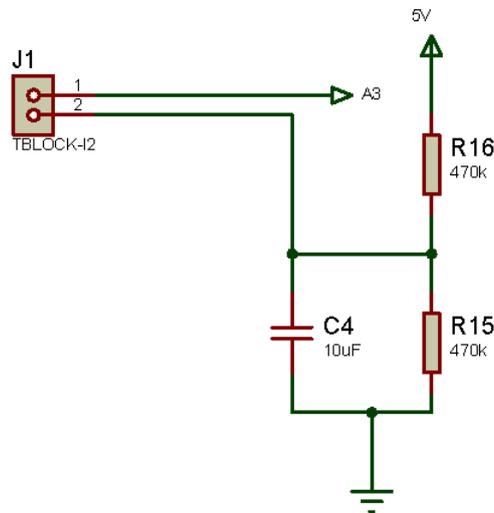


Figura 6. Circuito Acondicionamiento de Corriente.

Fuente: Elaboración propia

$$V_{elevador} = 5v * \frac{470k\Omega}{470k\Omega+470k\Omega} = 2.5v$$

Ec.8

$$V_{out_{max}} = V_{elevador} + V_{pinza} = 2.5 + 1.7 = 4.2v$$

Ec.9

Los circuitos de acondicionamiento para la lectura de tensión y de corriente se repiten 3 veces por cada uno, las señales de salida están conectadas a las entradas analógicas del Arduino Mega desde A0 hasta A5.

La siguiente etapa de diseño hardware corresponde al circuito conversor análogo digital, circuito integrado dentro del Arduino mega,

tiene una resolución de 10 bits lo que equivale a 1024 valores digitales, donde 0 representa 000000000b y 5v representa 111111111b. El periodo de muestreo del módulo ADC del Arduino es de aproximadamente 100 microsegundos lo que permite tomar alrededor de 160 muestras por cada ciclo de la señal AC a una frecuencia de 60HZ, el número final de muestras que se puede tomar va a depender de la programación.

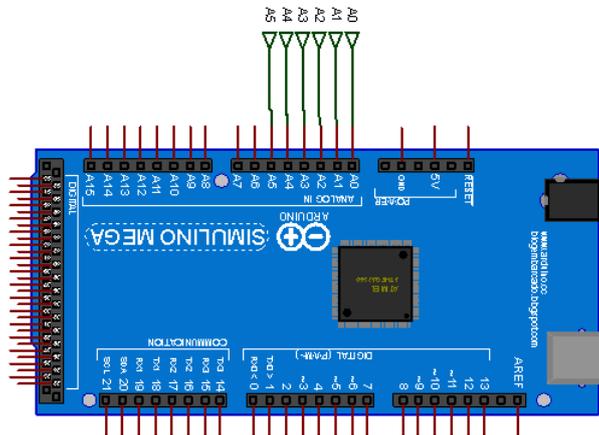


Figura 7. Arduino Mega 2560
Fuente: Elaboración propia

La unidad de procesamiento es la plataforma de desarrollo Arduino Mega 2560, modelo seleccionado debido a su cantidad de puertos necesarios para la conexión de los periféricos de entrada y salida y para la conexión de las entradas analógicas. Sus características principales según ANTONY GARCÍA GONZÁLEZ (2013) son:

- Voltaje Operativo: 5V
- Voltaje de Entrada: 7-12V
- Pines digitales de I/O: 54 (15 salidas PWM)
- Pines analógicos: 16
- Corriente DC I/O: 40 mA
- Corriente DC I/O a 3.3V: 50 mA
- Memoria Flash: 256 KB
- SRAM: 8KB
- EEPROM: 4KB
- Velocidad: 16 MHz

Por último, tenemos la etapa de conexión de los periféricos de entrada y de salida, se selecciona un GLCD de 128 x 64 pixeles para una mejor visualización de las gráficas de tensión y corriente, un teclado matricial de 4x4 que in-

cluya flechas para el desplazamiento entre las gráficas, y un módulo de escritura y lectura de memorias SD para almacenar los datos medidos de la red trifásica.

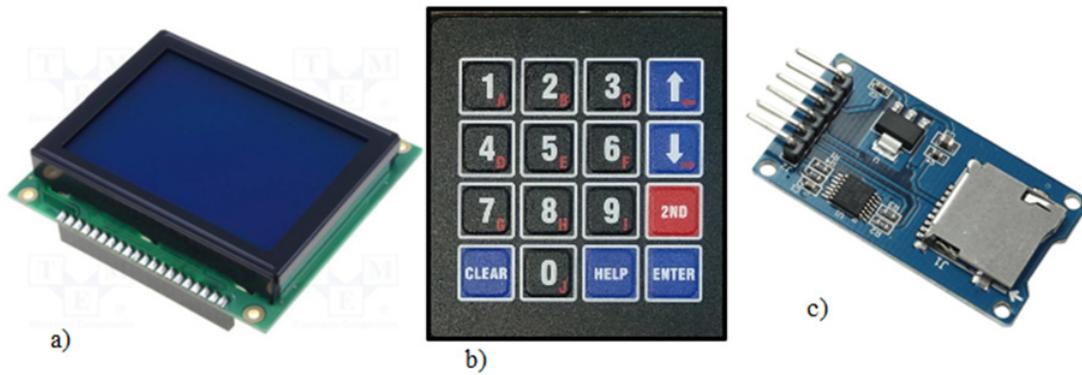


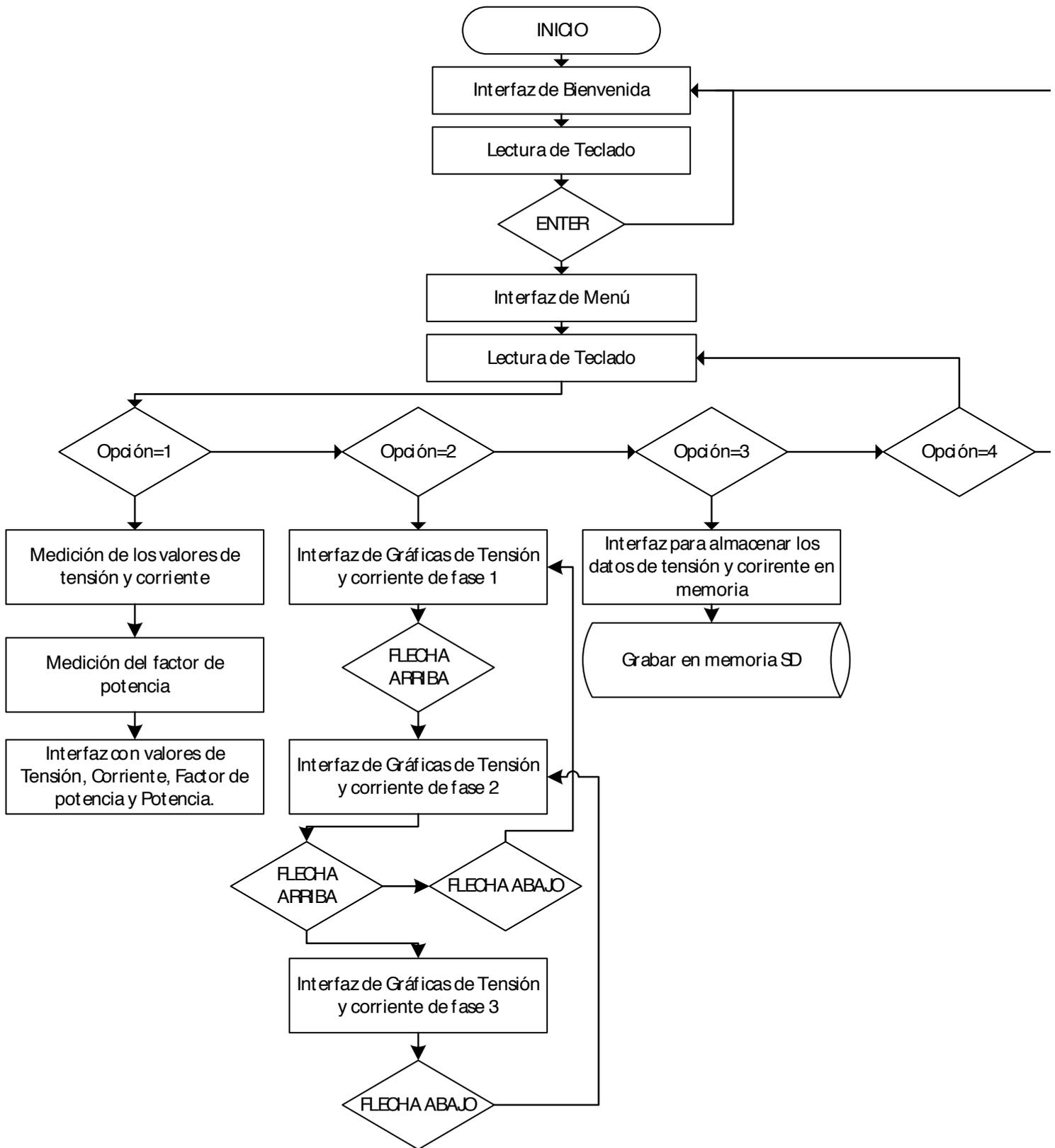
Figura 8. Periféricos de Entrada y salida: a) GLCD 128x64, b) Teclado matricial 4x4 y c) Módulo de escritura y lectura SD.
Fuente: Elaboración propia

Diseño de Software

Para la programación se utiliza el lenguaje propio de Arduino que está basado en un lenguaje de programación de alto nivel similar a C++. La ventaja de usar el entorno de desarrollo de Arduino sobre otras placas es debido a que es una herramienta de Software libre con una alta cantidad de desarrolladores que facilita la solución de problemas, además de que cuenta con un alto número de librerías disponibles para la integración de distintos tipos de módulos (Torrente, 2013).

El diseño del Software parte de la medición de las señales análogas y la conversión a sus valores reales, a través del procesamiento digital de los datos recibidos, a continuación, el diseño del Software se centró en presentar la información necesaria para que el usuario pueda interactuar con el módulo y cada uno de sus menús, integrando de modo funcional cada uno de los componentes externos al Arduino.

El diagrama de flujo siguiente describe el proceso funcional del Software implementado.



Diseño Final.

La etapa final del desarrollo incluye la integración y conexión de todos los componentes del sistema, se opta por una estructura prismática para poder almacenar todos los elementos y facilitar su transporte. La apariencia y dimensiones se aprecian en la figura siguiente.

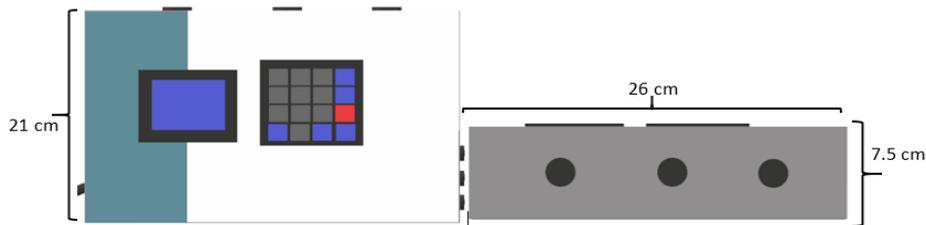


Figura 10. Diseño y Dimensiones prototipo de Analizador de Red.
Fuente: Elaboración propia

En la vista superior se tiene la pantalla GLCD y el teclado, de la vista lateral superior salen los conectores lagartos para la medición de tensión de fase, de la vista lateral derecha salen las pinzas amperimétricas para la medición de la corriente de fase y de la vista lateral izquierda sale el cargador para la alimentación del módulo.

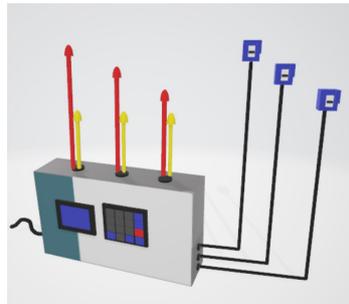


Figura 11. Diseño y posición de conectores
Fuente: Elaboración propia

El propósito de realizarlo de esta forma es facilitar la conexión del analizador a la red trifásica. Donde cada par de conectores lagarto se conecta a una fase y a la línea de neutro, y por su parte las pinzas al no ser invasivas, basta que rodeen la línea de fase que le corresponde.

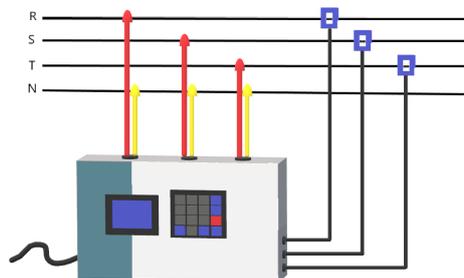


Figura 12. Esquema de conexión a la red Trifásica
Fuente: Elaboración propia

Acabado el desarrollo se procedió al ensamblado y la realización de pruebas de funcionamiento. En la figura se aprecia el prototipo final del Analizador de Red trifásico.



Figura 13. Prototipo de Analizador de Red Trifásica
Fuente: Elaboración propia

Se realizó pruebas de funcionamiento del Hardware, Software y de la interfaz de Usuario (Rincón Roa, Cadena Téllez, & Flórez Franco, 2019), al conectar el cargador de alimentación del módulo se encendió la pantalla mostrando el logo del instituto.



Figura 14. Puesta en funcionamiento prototipo Analizador de Red.
Fuente: Elaboración propia

Se conectó uno de los pares de lagartos y la pinza amperimétrica a una carga de 40 watts, Se presionó la tecla ENTER y se desplegó el menú de opciones.



Figura 15. Interfaz de Bienvenida y Menú de Opciones.
Fuente: Elaboración propia

Se escogió la primera opción presionando la tecla número 1, a continuación, se mostró la pantalla que resume el estado de las señales conectadas, la tensión y corriente eran las esperadas, se pudo comparar con los valores medidos por un multímetro dando los mismos resultados. La potencia final consumida por el equipo era

de 36.5 watts, a continuación, se presionó la tecla número 2 y la interfaz gráfica se visualizó se aprecia la forma de la onda ac conectada, por último, se presionó la tecla número 3 y en la nueva interfaz aparece el mensaje de que los datos medidos se están almacenando, así como un contador de tiempo.

Tabla 1. Costos de implementación.

COSTOS DE MATERIALES		
Proyecto Analizador de Red Trifásica.		
Materiales	V/unitario	V/total
Arduino Mega	22,00	22,00
Cables lagartos	0,50	6,00
Transformadores	7.50	22.50
Sensores de corriente	16.00	48,00
Elementos electrónicos		10,75
Caja	18.00	18.00
TOTAL		126,5

Fuente: Elaboración propia de lista detallada de costos de materiales

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.

La elección correcta del transformador es de suma importancia para el diseño, se deben realizar pruebas de los valores de salida y de su relación con respecto a la entrada antes de proceder al acondicionamiento, debido a que presentaron variaciones respecto a sus valores nominales de tensión establecidos, la forma de dar solución fue reemplazar una de las resistencias fijas del divisor por un potenciómetro de precisión, permitiendo así una mejor afinación de los dispositivos.

El uso de pinzas amperimétricas resultó ventajoso en el momento de la conexión, pero la resolución de su salida es muy baja para corrientes menores a 1 amperio, dando valores incluso menores al valor mínimo perceptible por la entrada analógica del Arduino, como recomendación usar el analizador para corrientes mayores al valor citado.

Una desventaja del uso del conversor ADC del propio Arduino es su falta de capacidad de

procesamiento en paralelo de más de una entrada analógica. Si bien tiene 16 entradas, internamente tiene un multiplexor que solo permite que trabaje uno a la vez. esto reduce precisión al momento de medir el desfase entre las señales pudiendo introducir pequeños retrasos debido a la programación. Se recomienda para una mejora futura la implementación de un módulo externo ADC además de con una mayor frecuencia de muestro.

Actualmente el sistema realiza la medición únicamente de tensiones de fase para la medición de corrientes de línea se debe cambiar los transformadores para que soporten tensiones superiores. En comparación con otros equipos comerciales el rango de costo del prototipo implementado está por debajo de las marcas más económicas, que prestan una cantidad similar de servicios.

BIBLIOGRAFÍA

Agencia de Regulación y Control de Electricidad. (2018). Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución. Servicio público de energía eléctrica. Período: enero - diciembre 2018. Retrieved from <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/2018-01-11-Pliego-y-Cargos-Tarifarios-del-SPEE-20182.pdf>

ANTONY GARCÍA GONZÁLEZ. (2013). ARDUINO MEGA: CARACTERÍSTICAS, CAPACIDADES Y DONDE CONSEGUIRLO EN PANAMÁ. Retrieved April 5, 2019, from <http://panamahitek.com/arduino-mega-caracteristicas-capacidades-y-donde-conseguirlo-en-panama/>

ARCONEL. (2018). El Directorio De La Agencia De Regulación Y Control De Electricidad. Retrieved from <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/01/074-17.doc.pdf>

Floyd, T. L. (2007). PRINCIPIOS DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS OCTAVA EDICIÓN. (PEARSON EDUCACIÓN, Ed.). México. Retrieved from www.pearsoneducacion.net/floyd

Rincón Roa, I. F., Cadena Téllez, W. G., & Flórez Franco, M. F. (2019). Diseño y construcción de un analizador de redes eléctricas para sistemas trifásicos de bajo voltaje. *I+D Revista de Investigaciones*, 6(2), 57-75. <https://doi.org/10.33304/revinv.v06n2-2015005>

Seymour, J., & Horsley, T. (2010). Los siete tipos de problemas en el Suministro Eléctrico, 1-22.

Torrente, Ó. (2013). Arduino. Curso práctico de formación. (Alfaomega, Ed.). México D.F.